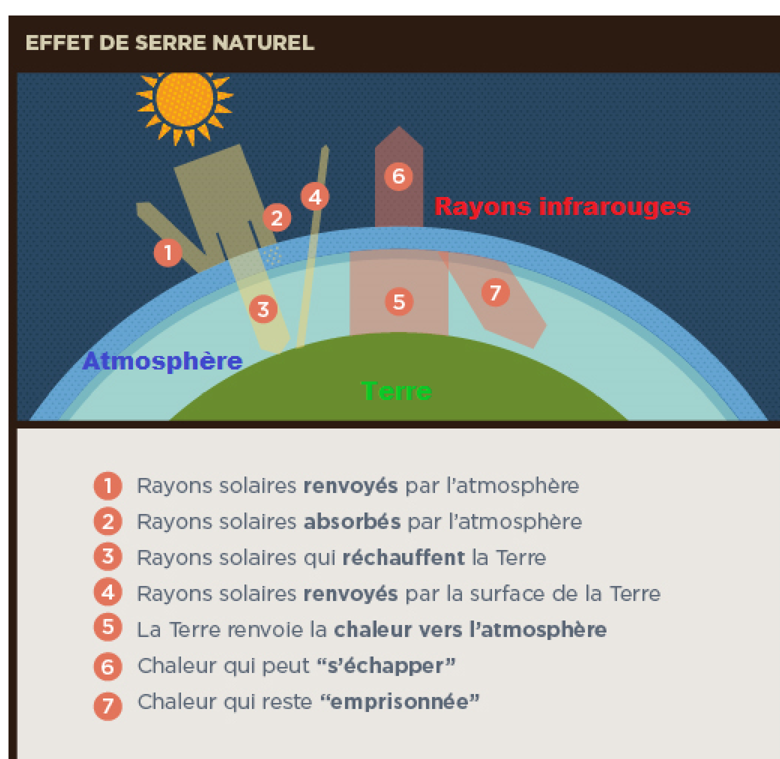
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES ROUEN NORMANDIE

Projet de Physique P6
STPI/P6/2018 - 37

Effet de serre et réchauffement climatique



Étudiants :
Laetitia Beignon
Dorothée Bertrand Seree–De Roch
Sarah Heilmer
Mélanie Laymajoux
Ariadni Liapi
Onja Rafamatanantsoa
Orlane Sevilla

Enseignant-responsable du projet :
Jérôme Yon

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com

Date de remise du rapport : 18/06/2018

Référence du projet : STPI/P6/2018 – 37

Intitulé du projet : Effet de serre et réchauffement climatique

Type de projet : Étude bibliographique, Modélisation et Étude expérimentale

Objectifs du projet :
- Comprendre l'effet de serre
- Modéliser les variations de température d'un corps noir selon la composition du milieu séparant le corps noir des rayonnements émis par une source chaude
- Visualiser l'effet de serre et obtenir des valeurs de températures à travers une expérience
- Comparer le modèle théorique et l'expérience
- Travailler en groupe

Mots-clés du projet : Effet de serre, Rayonnement, Modélisation, Transmission

Institut National des Sciences Appliquées de Rouen
Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur
685 Avenue de l'Université BP 08 - 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray
Tél : +33 2 32 95 66 21 - Fax : +33 2 32 95 66 31

Table des matières

Notations et Acronymes **3**

Introduction **4**

Organisation du travail **5**

1 Définition de l'effet de serre et du réchauffement climatique **6**
1.1 Effet de serre naturel 6
1.1.1 Explication du phénomène 6
1.1.2 Ses composants 7
1.2 Effet de Serre induit 8
1.3 Les solutions 8

2 Modélisation de l'effet de serre **9**
2.1 Le rayonnement thermique 9
2.2 Modélisation des échanges thermiques 15
2.2.1 Solides séparés par le vide ou un milieu transparent 15
2.2.2 Surfaces séparées par un milieu semi-transparent, participant aux échanges, tel que l'atmosphère chargée de CO_2 16

3 Expérience **20**
3.1 Présentation de l'expérience 20
3.2 Protocole expérimental 20
3.3 Résultats et observations 22
3.4 Sources d'erreurs et améliorations possibles 23

Conclusion et perspectives **24**

Notations et Acronymes

CN : Corps noir
M : Emittance en $Watt/m^2$
L : Luminance en $Watt/(m^2.sr)$
ϵ : Emissivité (sans unité)
α : Coefficient d'absorption (sans unité)
τ : Coefficient de transmission (sans unité)
ρ : Coefficient de réflexion (sans unité)
E : Eclairement en $Watt/m^2$
ϕ : Flux en Watt
Ω : Angle solide en sr
σ : Constante de Stefan-Boltzmann $Watt.m^{-2}.K^{-4}$
T : Température en K

Introduction

Nous sommes sept étudiants de deuxième année de l'INSA de Rouen et dans le cadre du Projet P6 nous avions un semestre pour mener à bien un projet en groupe. Nous avons choisi le projet intitulé "Effet de serre et réchauffement climatique".

L'objectif de ce projet est de définir l'effet de serre à travers une expérience et un modèle numérique. Pour se faire, il faut montrer que l'effet de serre est à l'origine d'une augmentation de la température terrestre due au principal composant de l'atmosphère de la Terre : le CO_2. En effet, l'une des conséquences de l'effet de serre est la modification des conditions climatiques. Les scientifiques du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) ont estimé une augmentation moyenne de la température à la surface de la Terre entre 1.4°C et 5,8°C en 2100. Cette future élévation de la température aura des répercussions dévastatrices sur l'environnement.

Tout d'abord, nous sommes partis sur le modèle de la Terre, entourée de son atmosphère, recevant les rayons du Soleil. Par la suite, nous avons choisi un modèle simplifié avec du verre placé entre une source lumineuse et un corps noir dans le but de modéliser le dispositif expérimental décidé et de pouvoir comparer les résultats obtenus. En effet, le verre est utilisé dans les serres pour cultiver des plantes et repose sur le principe de l'effet de serre. Ensuite, nous avons complexifié notre modèle en superposant une couche de verre et une couche de CO_2 en guise d'atmosphère. On a étudié les différences entre les deux modèles cités précédemment dans le but d'expliquer le réchauffement climatique induit par l'effet de serre.

Dans ce rapport, nous allons présenter dans un premier temps des informations générales sur le sujet. Nous expliquerons l'effet de serre naturel ainsi que l'effet de serre créé par l'homme. Nous vous présenterons ensuite des notions physiques utiles pour la compréhension de notre travail et vous présenterons notre avancée progressive sur le modèle ainsi que ses résultats. Enfin, nous vous présenterons l'expérience et nous ferons un bilan comparatif avec le modèle théorique.

Organisation du travail

Les trois premières séances du projet furent consacrées aux recherches documentaires pour comprendre le phénomène de l'effet de serre. Chacun faisait des recherches et nous les partagions ensuite. Nous avons alors compris le phénomène à montrer.

Onja a alors proposé de faire une expérience pour mettre en évidence l'effet de serre. Onja, Laetitia, Dorothée et Sarah ont préparée et réalisée cette expérience.

Pendant ce temps, Ariadni, Orlane et Mélanie ont décidé de modéliser l'effet de serre. Pour cela, elles ont utilisé le logiciel Scilab.

Mélanie était en charge du bon déroulement du rapport ainsi que de sa mise en page. Notre rapport se divise en trois parties. Tout le monde a participé à la rédaction de la première partie. Onja a rédigé la partie concernant l'expérience et enfin, Ariadni et Mélanie la partie sur la modélisation de l'effet de serre. Nous avons essayé, pour la partie modélisation, de rédiger au fur et à mesure de notre avancée pour que tout le groupe puisse se tenir informé de l'avancement du projet.

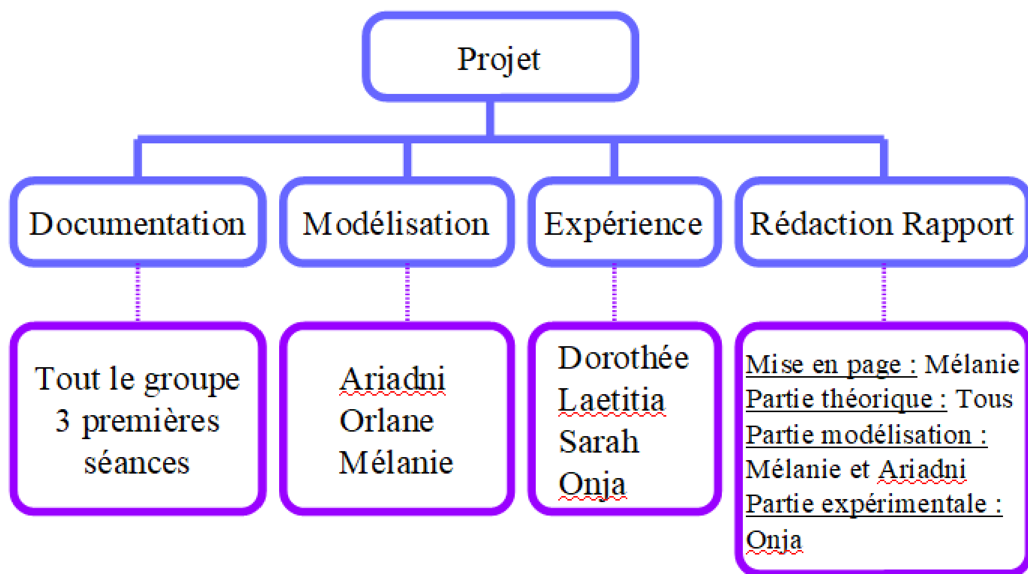


FIGURE 1 – Organisation du travail

Chapitre 1

Définition de l'effet de serre et du réchauffement climatique

1.1 L'effet de serre naturel

L'effet de serre est un phénomène naturel provoquant une élévation de la température à la surface de notre planète. Néanmoins, aujourd'hui, les activités humaines perturbent cet équilibre en affectant la composition chimique de l'atmosphère et entraînent l'apparition d'un effet de serre additionnel. Ce dernier étant responsable des changements climatiques actuels.

1.1.1 Explication du phénomène

Dans cette partie, nous allons nous intéresser au principe de l'effet de serre naturel, qui est à l'origine de la vie humaine sur Terre, et à ses différents composants.

Tout d'abord, la Terre reçoit de l'énergie de la part du soleil sous forme de chaleur et de lumière. Environ la moitié de ce rayonnement de courte longueur d'onde est réfléchie par l'atmosphère et la surface terrestre. C'est l'effet albédo. L'autre moitié est absorbée par la surface et réchauffe la Terre. Cette chaleur est ensuite renvoyée sous forme de rayonnement ascendant de grandes longueurs d'onde. Une partie de cette chaleur part dans l'espace mais une seconde partie est absorbée dans l'atmosphère par les gaz à effet de serre et renvoyée sur la Terre. Ce phénomène est appelé "Effet de Serre". En fait, les gaz à effet de serre ont la particularité d'être opaques au rayonnement infrarouge émis par la terre mais d'être pratiquement transparent au rayonnement solaire.

Grâce à cet équilibre, la température moyenne sur Terre est plus ou moins constante dans le temps. Des études montrent que sans cet effet de serre de l'atmosphère, la température moyenne de la Terre serait au plus de -19 degrés au lieu des 15 degrés que nous connaissons. Cela signifie que l'effet de serre assure un réchauffement de 32 degrés. Sans ce phénomène la Terre serait un désert gelé et ne permettrait pas la vie. En effet, une température de 15°C assure la présence d'eau liquide et donne une voie d'accès à la vie sur Terre.

Pour être plus précis, détaillons l'équilibre thermique de notre système d'étude (cf figure1.1).

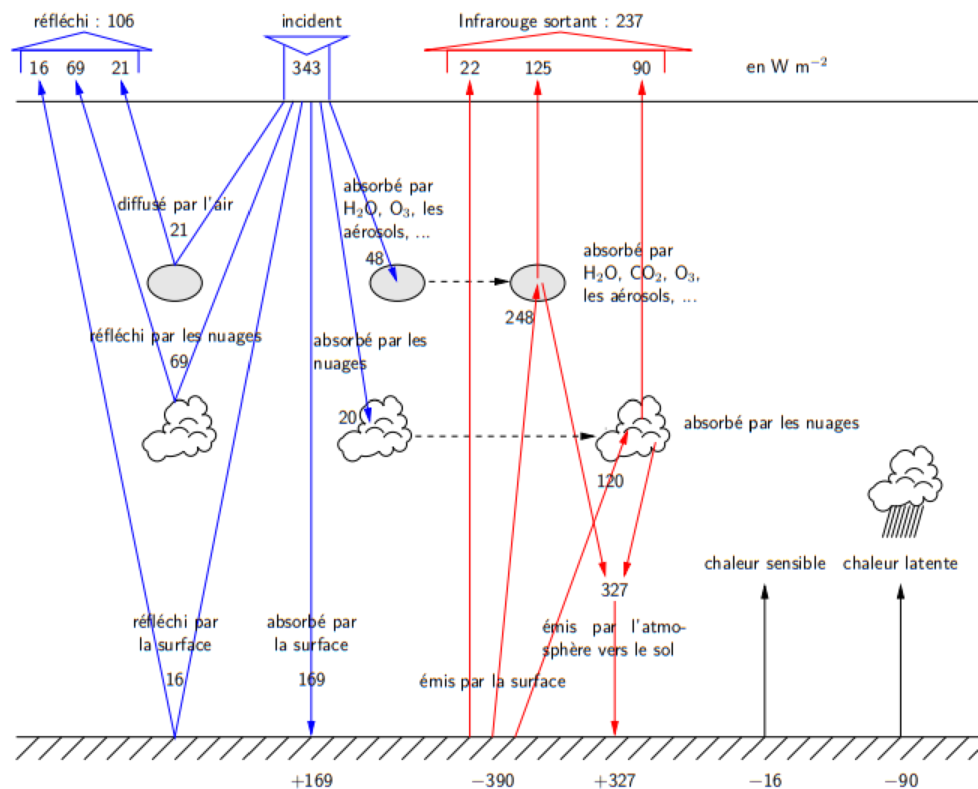


FIGURE 1.1 – Bilan radiatif global en $W.m^2$

A l'équilibre thermique d'un système il y a autant de flux entrant dans l'atmosphère terrestre que de flux sortant. La puissance surfacique solaire reçue par la Terre est égal à 1360 $Watt.m^{-2}$, ce qui donne pour une répartition spatiale sur l'ensemble de la sphère terrestre une puissance surfacique de 343 $Watt.m^{-2}$. Ainsi, la Terre et son atmosphère, à l'équilibre thermique, émettront vers l'espace une puissance surfacique égale à 343 $Watt.m^{-2}$.

Pour commencer, 30% de l'énergie envoyée par le soleil, sous forme de rayonnement visible, est réfléchie directement dans l'espace par la surface terrestre et l'atmosphère. On nomme ce phénomène l'albédo. L'albédo représente le rapport de l'énergie réfléchie sur l'énergie incidente émise par la source. Il y a donc déjà une perte de 106 $Watt.m^{-2}$. Le reste de l'énergie est absorbé par l'atmosphère (68 $Watt.m^{-2}$) ainsi que par la surface terrestre (169 $Watt.m^{-2}$). La surface terrestre va émettre de la chaleur sous 3 formes : convection, chaleur latente (provenant essentiellement de la vaporisation des océans) et rayonnement électromagnétique. Cette chaleur va être absorbée par l'atmosphère dans le cas de la convection et de la chaleur latente. Le rayonnement thermique, sous forme d'infrarouge, va être à la fois absorbé et réfléchi par l'atmosphère ou renvoyé dans l'espace. La réflexion va renvoyer les rayonnements vers la surface de la Terre ou dans l'espace. La transparence ou l'opacité de l'atmosphère va fortement dépendre de l'énergie et de la longueur d'onde du rayonnement. On peut considérer que la Terre et le Soleil sont des « corps noirs ». Leur rayonnement ne dépend donc que de leur température et pas de la nature de leur corps. La Terre, ayant une plus faible température, émet dans le domaine de l'infrarouge et le Soleil dans le visible. Nous verrons plus loin cette théorie des corps noirs avec la loi de Planck. Ainsi, l'atmosphère est transparent au rayonnement visible et plus opaque au rayonnement infrarouge. Ce processus assure une température d'équilibre de 15°C à la Terre.

1.1.2 Ses composants

Nous allons maintenant expliquer ce phénomène en regardant la composition de l'atmosphère. Il faut savoir que ce n'est pas tant la distance entre le Soleil et la planète qui influence la température de cette dernière mais la composition de son atmosphère. En effet, la planète Mercure est deux fois plus proche du Soleil que Vénus et pourtant Vénus a une température de 460 °C contre 420°C pour Mercure. L'explication réside dans l'atmosphère de Vénus, chargé à 96.5 % de CO_2. Le CO_2 est un gaz à effet de serre.

Les molécules de CO_2 absorbent dans l'infrarouge du fait de leur état vibratoire et rotationnel. Cette absorption entraîne une augmentation de l'état vibratoire des molécules et un échauffement de l'air lors des collisions entre particules. En effet, les particules de gaz sont des corps noirs de température faible et émettent dans l'infrarouge. Ce rayonnement émis est absorbé soit par les particules de gaz voisines, soit par la surface terrestre. Dans le cas où les molécules de CO_2 sont peu nombreuses et hautes dans l'atmosphère, elles peuvent céder leur rayonnement à l'espace. Le CO_2 piège le rayonnement infrarouge émis par la Terre et permet de conserver une température moyenne terrestre de 15°C.

Comme nous l'avons vu précédemment, un gaz à effet de serre est un gaz présent dans l'atmosphère terrestre pouvant intercepter les infrarouges émis par la surface terrestre.

Les deux principaux gaz responsables de l'effet de serre naturel et contenus dans l'atmosphère de la Terre sont :

- la vapeur d'eau (H_2O)
- le gaz carbonique (CO_2)

A l'origine le CO_2 permet un effet de serre naturel mais depuis la révolution industrielle de 1750, la concentration du dioxyde de carbone ne cessant d'augmenter, le CO_2 se trouve aussi être responsable d'un effet de serre additionnel bouleversant l'équilibre de notre planète. Cela est la conséquence de l'évolution de certaines activités humaines telles que le chauffage, les transports ou l'utilisation de pétrole ou charbon pour l'industrie.

1.2 L'effet de serre causé par l'homme

Nombreux sont les experts qui se questionnent sur les origines et conséquences du réchauffement climatique depuis quelques décennies. Selon les scientifiques du GIEC (groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat), l'activité humaine serait responsable à hauteur de 95 % du dérèglement climatique. Le niveau de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a toujours connu des variations naturelles, cependant, aujourd'hui, le mode de vie occidental provoque un réchauffement climatique d'une ampleur et d'une vitesse inouïe. En effet, la concentration de ces gaz a fortement augmenté depuis 1750, début de l'ère industrielle, les experts du GIEC estime dans leur rapport publié en 2013 une augmentation d'environ 40 % depuis cette date, participant de ce fait à l'augmentation direct de l'effet de serre dans l'atmosphère. L'ajout de CO_2, gaz à effet de serre, dans l'atmosphère va intensifier le nombre de molécules dans les hautes couches de l'atmosphère. Or, la diminution d'espace entre les molécules va piéger le rayonnement dans l'atmosphère sous forme de chaleur. En effet, quand une molécule de CO_2 va libérer un rayonnement infrarouge, les molécules de CO_2 voisines vont l'absorber. De plus, dans les hautes couches de l'atmosphère les molécules sont plus froides et comme d'après la loi de Planck, un corps froid émet moins d'énergie, les molécules vont émettre moins facilement le rayonnement infrarouge. Elles vont le conserver et ne le céderont pas à l'espace. Ces deux facteurs vont accroître la température terrestre. Nous distinguons trois principales activités humaines responsables de l'augmentation de l'effet de serre. Tout d'abord il y a l'industrie et les transports qui sont des activités énergivores en CO_2. En effet ce gaz est principalement émis par la combustion d'énergies fossiles. Au total, 66 % des GES sont du à cela. Ensuite Il y a aussi l'agriculture intensive qui est responsable de l'émission de méthane. Cette activité représente 13,8 % des émissions de GES.

1.3 Les solutions

Nous connaissons les conséquences négatives du réchauffement climatique et leur gravité, il est donc nécessaire de les limiter. Pour cela il est important de réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Au niveau politique les dirigeants discutent du futur de la planète lors de nombreuses conférences et essayent de trouver des compromis pour tous les acteurs de la société dans la limite du faisable. Des centaines de pays ont adopté la convention sur les changements climatiques (CCNUCC) qui reconnaît la responsabilité des activités humaines dans l'existence des changements climatiques. L'objectif énoncé dans cet conférence est de stabiliser les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation dangereuse du système climatique. La conférence la plus mémorable est la COP21 en 2015. L'accord de Paris ratifié par de nombreux pays a été une étape historique dans la reconnaissance internationale de la notion de changement climatique. Un accord universel qui a comme objectif de contenir la hausse des températures bien en deçà de 2 °C. De plus, les êtres humains ont la capacité de transformer le monde dans lequel nous vivons grâce à de nouvelles découvertes. Il ne fait aucun doute que certaines de ces nouvelles technologies amèneront à la disparition des carburants fossiles et constitueront un moteur de l'évolution vers une société plus durable. Il est aujourd'hui impératif de remplacer l'utilisation des carburants fossiles par des énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'énergie hydraulique.

Chapitre 2

Modélisation de l'effet de serre

2.1 Le rayonnement thermique : définitions et lois

Angle solide

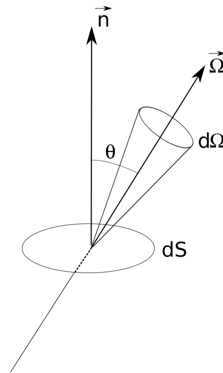


Figure 2.1 – Angle solide

L'angle solide 2.1 est l'équivalent tridimensionnel de l'angle plan. Son unité est le stéradian, noté sr.

L'angle solide $d^2\Omega$ représente l'aire de la surface interceptée sur une sphère de rayon unité par une surface conique (non nécessairement circulaire) dont le sommet correspond au centre de la sphère unité.

L'angle plan est le rapport de la longueur de l'arc sur le rayon.

L'angle solide, dans l'espace, est défini comme le rapport de l'aire d^2s de la surface conique interceptée sur la distance entre le sommet de l'angle solide élémentaire et la surface élémentaire d^2s au carré.

$d^2\Omega = \frac{d^2s}{R^2}$

$d^2\Omega$ **: angle solide élémentaire en** sr

d^2s **: surface infinitésimale de la portion de sphère interceptée en** m^2

R **: rayon de la sphère concentrique en** m

Dans le cas où le rayon de courbure R du corps est grand devant les dimensions de la surface d^2s du corps radiant on peut considérer la surface comme plane. Ainsi, $d^2s = d^2S$ où d^2S représente la surface de la grande sphère projetée sur un plan.

On a alors la formule simplifiée suivante : $d^2\Omega = \frac{d^2S}{R^2}$.

Nous verrons que cette approximation sera utile dans le calcul de l'éclairement du Soleil sur la Terre. En effet, nous ne considérons pas la surface d'une sphère de la Terre ou du Soleil, égal à $4 \times \pi \times R^2$, mais les disques exposées aux rayonnements de formule $\pi \times R^2$.

Dans la formule de l'angle solide élémentaire précédente nous n'avons pas pris en compte l'angle selon lequel est perçu la surface conique par rapport à la normale formée par l'angle solide élémentaire. La surface d^2S a besoin d'être projetée pour être orthogonal à la normale de l'angle solide. Ainsi, d^2S devient $d^2S \times cos(\theta)$.

On obtient la relation :

$d^2\Omega = \frac{d^2S \times cos(\theta)}{R^2}$

θ : est l'angle entre la normale à la surface de la sphère unité $d^2\Omega$ et la normale à la surface de la sphère conique interceptée d^2S

Si la surface est petite devant la distance R, on peut considérer la distance constante. On obtient alors $\Omega = \frac{S \times cos(\theta)}{R^2}$.

Un angle solide vaut 4π sr puisque la surface d'une sphère est $4\pi R^2$.

Intensité

L'intensité est le flux par unité d'angle solide dans une direction ox. Son unité est le W/sr.
L'intensité totale dans la direction ox :

$$I_{ox} = \frac{d\Phi_{ox}}{d\Omega}$$

$d\Phi_{ox}$: flux total rayonné par la source dS dans un angle solide élémentaire $d\Omega$ entourant la direction ox
L'intensité monochromatique dans la direction ox :

$$I_{ox,\lambda} = (\frac{dI_{ox}}{d\lambda})_\lambda = \left(\frac{d^2\phi_{ox}}{d\Omega d\lambda}\right)_\lambda$$ **.** $I_{ox,\lambda}$**s'exprime en** $W/(m.sr)$.

Luminance

La luminance énergétique peut être définie comme l'intensité d'une source d'aire dS dans la direction ox divisée par la surface projetée. La luminance est aussi la puissance par unité de surface projetée du rayonnement passant ou étant émis en un point d'une surface et dans une direction donnée par unité d'angle solide. Son unité est le $W/(m^2.sr)$.

$$L_{e,ox} = \frac{I_{ox}}{dScos(\theta)} = \frac{d^2P_e}{d\Omega \times dS \times cos(\theta)} = \frac{d^2\phi_e}{d\Omega \times dS \times cos(\theta)}$$

$d\phi_e$: flux élémentaire émis par dS en direction d'une autre surface

$d\Omega$: angle solide élémentaire sous lequel on voit la seconde surface depuis le point source contenu dans dS

On peut différencier la luminance monochromatique $L_\lambda$de la luminance totale $L = \int_0^\infty L_\lambda d\lambda$.

La luminance peut permettre de comparer la puissance dans une direction donnée de sources étendues différentes ou la puissance pour une même source dans différentes directions.

Quand les sources sont à émission isotrope ou diffuse, la luminance est indépendente de la direction. On a alors $L_{ox} = L$. Donc $L_{e,ox} = \frac{I_{ox}}{dScos(\theta)} = \frac{I_{on}}{dS}$ (dans la direction *on* normale à dS). On a bien l'égalité $I_{ox} = I_{on} \times cos(\theta)$. Ces formules sont connues sous le nom de la loi de Lambert.

Exitance ou émittance

L'exitance est le flux d'énergie total émis par un élément de surface dS dans toutes les directions où il peut rayonner (hémisphère limité par le plan tangent à dS en son centre. Son unité est le W/m^2.

$$M_e = \frac{d\phi}{dS}$$

La loi de Lambert pour un corps noir donne l'émittance énergétique totale :

${M_e}^\circ = \pi \times {L_e}^\circ$ (le $^\circ$ précise que cette formule n'est applicable qu'à un corps noir). Cette expression n'est valable que dans le cas d'une émission diffuse (émissivité indépendante de la direction).

Un corps noir est un objet qui absorbe toute l'énergie électromagnétique reçue. Il ne transmet pas, ne réfléchit pas et ne diffuse pas l'énergie incidente.

Dans notre étude nous ferons d'abord l'hypothèse que la Terre et le Soleil sont des corps noirs. Par la suite, nous affinerons notre modèle en supposant que les corps étudiés sont des corps gris et diffusants. En effet, le corps gris se rapproche du corps réel et permet de simplifier les calculs d'émissivité que nous verrons plus loin.

Un corps gris a une émissivité indépendante de la longueur d'onde $\varepsilon_\lambda \to \varepsilon$.

L'émittance monochromatique d'un corps noir sera ${M_\lambda}^\circ = \pi \times {L_\lambda}^\circ$.

L'émittance monochromatique pour un corps réel est $M_\lambda = \varepsilon_\lambda \times {M_\lambda}^\circ = (\frac{dM}{d\lambda})_\lambda = (\frac{d^2\phi}{dSd\lambda})_\lambda$. $M_\lambda$en W/m^3.

L'émittance totale pour un corps réel s'écrit $M = \varepsilon M^\circ$ où ε représente l'émissivité.

L'exitance est utilisé pour comparer les puissances émises par des sources d'étendues différentes.

Loi de Planck

La loi de Planck permet de calculer la luminance énergétique spectrale d'un corps noir en fonction de la fréquence ν ou la longueur d'onde λ du signal considéré et de la température T du corps noir.

$$L^0(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \times \frac{1}{\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp(\frac{hc}{kT}) - 1}$$

constante de Planck $h = 6.6255 \times 10^{-34} J.s$

constante de Boltzmann $k = 1.3805 \times 10^{-23} J/K$

$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ **avec** λ_0 **la longueur d'onde du rayonnement du corps noir dans le vide et** n **l'indice de réfraction du milieu.**

$c = \frac{c_o}{n}$ **avec** c_0 **la vitesse de la lumière dans le vide et** n **l'indice de réfraction du milieu.** La loi de Planck permet d'obtenir l'émittance à partir de la longueur d'onde λ et la température T du corps noir.

$M^0(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp(\frac{hc}{kT})-1}$ La loi de Planck est souvent modélisée par des courbes représentants l'émittance en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures. On constate qu'un corps émet un rayonnement thermique provenant d'une faible portion du spectre des ondes électromagnétiques comprenant l'ultra-violet, le visible et l'infra-rouge.

On remarque que, quand la température T augmente, la longueur d'onde du maximum de l'émittance λ_{max} se déplace vers les courtes longueurs d'onde. On en déduit qu'un corps commence à émettre dans l'infra-rouge puis couvre le visible et l'ultra-violet si sa température le permet.

Pour une température $T_T = 273.15K$ de la Terre 2.2, le corps émet principalement un rayonnement dans le domaine de l'infra-rouge alors que, pour une température $T_S = 5778K$ du Soleil 2.3, le corps émet dans tout le domaine visible. Cette émission dans des domaines spectraux qui ne se chevauchent pas permet l'existence de l'effet de serre naturel.

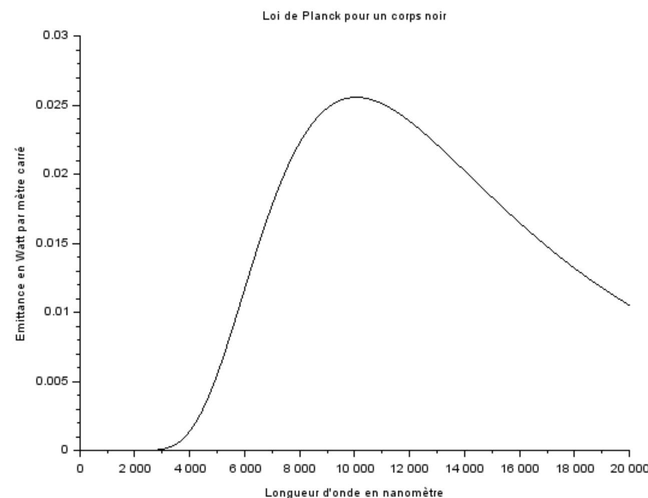


FIGURE 2.2 – Loi de Planck pour la Terre

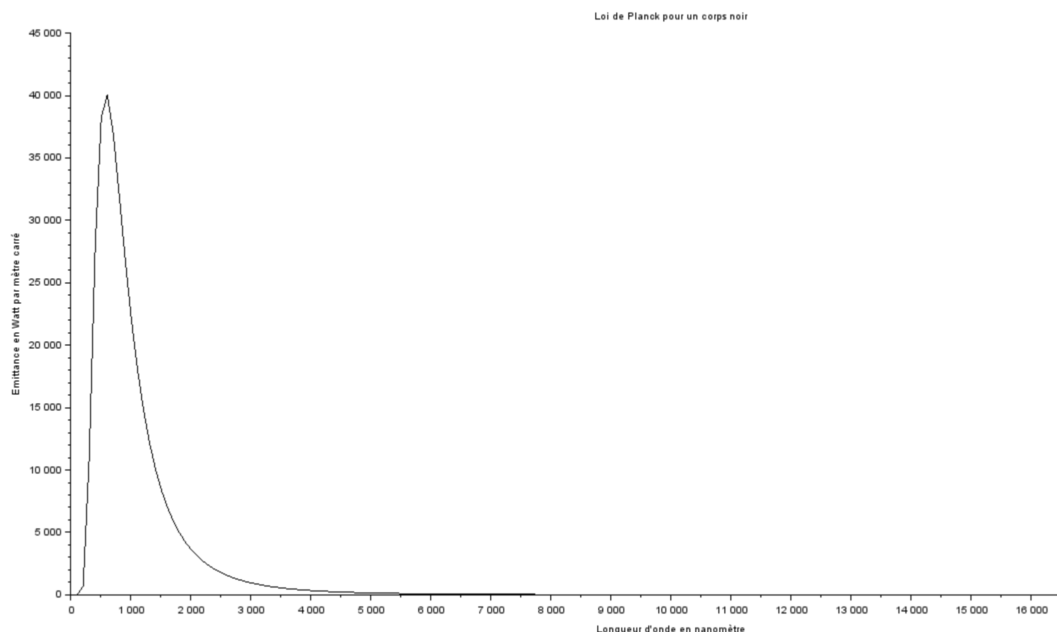


FIGURE 2.3 – Loi de Planck pour le Soleil

Eclairement lumineux

Dans le cas d'un rayonnement incident, on parle d'éclairement de la surface réceptrice. Cette notion remplace l'émittance, valable pour un rayonnement émis. Les grandeurs telles que le flux, l'intensité et la luminance s'appliquent aussi bien au rayonnement émis par une surface qu'au rayonnement reçu par celle-ci.

L'éclairement lumineux est le flux lumineux reçu par unité de surface. Il s'exprime en W/m^2.

$$E = \frac{d\phi}{dS}$$

Pour les sources secondaires diffusantes on a une relation entre l'éclairement et l'émittance.

En cas de transmission, $M = \tau E$ avec τ le coefficient de transmission.

En cas de réflexion, $M = \rho E$ avec ρ le coefficient de réflexion.

Le flux

Le flux total est la puissance émise par une source dans tout l'espace. Son unité est le Watt.

Le flux monochromatique est $\phi_\lambda = (\frac{d\phi}{d\lambda})_\lambda$.

Loi de Stefan-Boltzmann

La loi de Stefan-Boltzmann lie l'exitance énergétique d'un corps en W/m^2 et la température de T de ce corps en Kelvin.

Pour un corps noir nous avons l'expression $\phi_{émi}^{CN} = M = \sigma T^4$. Cette expression peut être obtenue par intégration de la formule de Planck sur l'ensemble du spectre.

Si on considère que le soleil est un corps noir et qu'il a une température $T_S = 5778K$ nous obtenons $\phi_{émi} = 5.67 \times 10^{-8} \times (5778)^4 = 63196527W/m^2$.

Le flux émis par la Terre à une température $T_T = 273.15K$ donne $\phi_{émi} = 316W/m^2$.

Le flux ne dépend donc que de la température. Il y a une forte dépendance en T du fait de la puissance quatrième.

On peut remarquer que le flux émis par le soleil est 160000 fois plus élevé que celui de la Terre.

Si nous considérions la puissance émise par la surface du soleil nous utiliserions la formule $\phi_{émi} = \sigma T_S^4 \times 4 \times \pi R_S^2$.

Pour le cas général du corps réel nous avons :

$$M = \sigma \epsilon T^4$$

σ : constante de Stefan-Boltzmann

ϵ : émissivité compris entre 0 et 1.

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c_0^2}$$

$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$

$M = \phi_{emi}$

Fraction d'émittance

Pour connaître le flux émis par un corps à la température T dans un intervalle de longueur d'onde donné, on calcule le rapport du flux émis sur le flux total. Ce rapport correspond à la fraction d'émittance.

Soit un intervalle monochromatique donné $[\lambda_1; \lambda_2]$:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda = \sigma T^4 F_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_0^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda - \int_0^{\lambda_1} M_\lambda d\lambda = \sigma T^4 (F_{0-\lambda_2} - F_{0-\lambda_1})$$

$$F_{0-\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \times \int_0^{\lambda} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp(\frac{hc}{kT})-1} d\lambda$$

$$F_{0-\lambda T} = \frac{2\pi hc^2}{\sigma} \int_0^{\lambda} \frac{1}{(\lambda T)^5} \times \frac{d(\lambda T)}{\exp(\frac{hc}{kT})-1}$$

$$F_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda^0 d\lambda}{\int_0^{\infty} M_\lambda^0 d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda^0 d\lambda}{\sigma T^4}$$

On utilise une table pour calculer $F_{0-\lambda T}$ en fonction de la valeur de λT.

Emissivité

$$\varepsilon(T) = \frac{L(T)}{L^0(T)} = \frac{M_\lambda(T)}{M_\lambda^0(T)} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_\lambda M_\lambda^0(T) d\lambda}{\int_0^{\infty} M_\lambda^0(T) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_\lambda M_\lambda^0(T) d\lambda}{\sigma T^4}$$

On sait que le corps noir absorbe parfaitement toute l'énergie qu'il reçoit. Par conséquent, il émet le maximum d'énergie thermique possible. Ainsi, un corps réel émettra moins qu'un corps noir puisqu'il absorbera moins d'énergie. Son émissivité sera donc toujours inférieure à 1 puisque 1 correspond, par définition, à l'émissivité du corps noir.

L'émissivité va dépendre de nombreux paramètres telles que l'état de surface du corps, la nature physico-chimique du matériau, la longueur d'onde, la direction d'émission et la température de la surface. De ce fait, l'émissivité est dur à déterminer. Nous nous intéresserons donc à un modèle simplifié : des surfaces ayant une émissivité indépendante de la longueur d'onde et de la direction, c'est-à-dire des corps gris à émission diffuse.

Absorptivité

L'absorption correspond à la conversion d'un rayonnement thermique en énergie interne.

L'absorptivité totale est $\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i} = \frac{\phi_a}{E}$

ϕ_a **est le flux absorbé**

ϕ_i **est le flux incident**

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_\lambda E_\lambda d\lambda}{\int_0^{\infty} E_\lambda d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_\lambda E_\lambda d\lambda}{E}$$

Réflexivité

La réflectivité totale est $\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} = \frac{\phi_r}{E}$
ϕ_r est le flux réfléchi

Transmittivité

La transmittivité totale est $\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i} = \frac{\phi_t}{E}$
ϕ_t est le flux transmis
Ces trois grandeurs totales hémisphériques sont liées par la relation : $\alpha + \rho + \tau = 1$.

Loi du rayonnement de Kirchhoff

La loi de Kirchhoff donne une relation entre l'émissivité et l'absorptivité.
A l'équilibre thermique d'un corps, on a une égalité entre les flux émis et absorbé : $\varepsilon_{ox,\lambda} = \alpha_{ox,\lambda}$.
Si le flux est le même sur l'ensemble des directions de l'espace hémisphérique entourant la surface dS alors on a : $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$.
On écrit $\varepsilon = \alpha$ uniquement dans le cas de corps gris ou de corps noirs ($\varepsilon = \alpha = 1$).
En effet, si on prend le cas de la Terre et du Soleil et qu'on regarde l'émissivité et l'absorptivité de la Terre, l'émissivité dépendra du corps émetteur : la Terre alors que l'absorptivité dépendra du corps émetteur : le Soleil. Or, le Soleil et la Terre n'émettent pas dans le même spectre de longueurs d'onde donc on ne peut pas dire que $\varepsilon = \alpha$.

2.2 Modélisation des échanges thermiques

2.2.1 Solides séparés par le vide ou un milieu transparent

Calcul du flux lumineux du Soleil sur la Terre

D'après la relation donnée précédemment de la la luminance nous avons :

$$d\phi_{S\to T} = L_\lambda dS_S cos(\theta_s) d\Omega_s d\lambda$$

Rappel : $L = \int_0^\infty L_\lambda d\lambda$ avec L_λ : luminance monochromatique
$d\Omega_S$: angle solide sous lequel est vu, du soleil, la surface dS_T de la Terre. On sait que $d\Omega_S = \frac{dS_T cos(\theta_T)}{d_{TS}^2}$.
On en déduit la formule dite de Bouguer : $d\phi_{S\to T} = L_\lambda dS_S cos(\theta_S) \frac{dS_T cos(\theta_T)}{d_{TS}^2} d\lambda$.
Vu la distance on considère que les rayons lumineux arrivent parallèles à la normale. D'où,

$$d\phi_{S\to T} = L_\lambda dS_S \frac{dS_T}{d_{TS}^2} d\lambda = L_\lambda \pi R_S^2 \times \frac{\pi R_T^2}{d_{TS}^2} d\lambda$$

Rappel : On fait l'hypothèse que les faces exposées de la Terre et du Soleil sont des disques. En effet, la distance Terre-Soleil est grande devant les surfaces considérées du Soleil et de la Terre.
Remarque : On dit que le flux rayonné par cet élément est hémisphérique, car le flux se propage dans toutes les directions de l'espace. La notion de grandeur hémisphérique s'oppose à celle de grandeur directionnelle où la grandeur est caractérisée par sa direction de propagation relativement à la surface. Le flux et l'émittance sont des grandeurs hémisphériques tandis que l'intensité et la luminance sont des grandeurs directionnelles.

$$\int_0^{\phi_{S\to T}} d\phi_{S\to T} = \int_0^\infty L_\lambda \pi R_S^2 \times \frac{\pi R_T^2}{d_{TS}^2} d\lambda = \pi R_S^2 \times \frac{R_T^2}{d_{TS}^2} \int_0^\infty \pi L_\lambda d\lambda$$

$$\int_0^{\phi_{S\to T}} d\phi_{S\to T} = S_S \times \frac{R_T^2}{d_{TS}^2} \int_0^\infty M_\lambda d\lambda = S_S \times \frac{R_T^2}{d_{TS}^2} M = S_S \times \frac{R_T^2}{d_{TS}^2} \times \sigma T_S^4$$

Calcul de l'éclairement lumineux du Soleil sur la Terre

$$E = \frac{\phi_{S \to T}}{\pi R_T^2} = \frac{R_S^2}{d_{TS}^2} \times \sigma T_S^4$$

A.N. $E = \frac{(695700 \times 10^3)^2}{(149{,}6 \times 10^9)^2} \times 5.67 \times 10^{-8} \times (5778)^4 = 1366.7 W/m^2$ E est appelé la constante solaire.

Calcul de la température de la Terre sans effet de serre

La puissance est la quantité d'énergie solaire reçue par la planète Terre chaque seconde.
La puissance incidente est $P_i = \pi R_T^2 \times E$.
Cette puissance incidente dépend de l'albédo A.
$P_i = \pi R_T^2 \times E \times (1 - A)$ (65% de l'énergie reçue est absorbée par la Terre)
Nous faisons l'hypothèse d'un corps noir et dans ce cas toute l'énergie est absorbée par la Terre, ainsi l'albédo A est égal à 0.

Si on considère que la Terre est un corps noir alors la puissance réémise par la Terre sur l'ensemble de la surface de la Terre est $P_r = 4\pi R_T^2 \times M = 4\pi R_T^2 \times \sigma T_T^4$.

A l'équilibre radiatif, l'émission et l'absorption s'équilibrent. Le rayonnement émis ne dépend que de la température du corps. Ici le corps est la Terre qui émet un rayonnement infrarouge.

$P_i = P_r \Rightarrow \pi R_T^2 \times E = 4\pi R_T^2 \times \sigma T_T^4 \Rightarrow T_T^4 = \frac{E}{4 \times \sigma} \Rightarrow T_T = (\frac{E}{4 \times \sigma})^{\frac{1}{4}}$.

A.N. $T_T = \left(\frac{1366.7}{4 \times 5.67 \times 10^{-8}}\right)^{\frac{1}{4}} = 278.62K = 5.47$**°C** L'albédo A est la proportion de l'énergie reçue par la surface terrestre qui est réfléchie ou diffusée au lieu d'être absorbée. La Terre a un albédo de 0.35 environ. Cela signifie que 35% de l'énergie totale (toutes fréquences confondues) reçue par la Terre n'est pas absorbée. Si la Terre était un corps noir, alors son albédo serait nul : un corps noir absorbe intégralement l'énergie qu'il reçoit. Dans le cas d'une surface blanche l'albédo vaut 1 car toute l'énergie reçue est réfléchie. L'albédo va dépendre du paysage au niveau de la Terre (une couche de neige aura un albédo plus fort qu'une étendue d'arbres) ou de la couche nuageuse. Cette notion ne fait pas la différence entre la réflexion ou la diffusion due à la structure externe de la Terre et la réflexion due à la composition de l'atmosphère entourant la Terre. Nous n'utiliserons donc pas l'albédo dans notre cas, qui consiste à analyser la Terre avec ou sans effet de serre. Cependant, nous la mentionnons pour faire prendre conscience que le modèle terrestre réel n'absorberait pas toute l'énergie reçue et donc, que sa température serait encore inférieure à celle que nous avons trouvée.

2.2.2 Surfaces séparées par un milieu semi-transparent, participant aux échanges, tel que l'atmosphère chargée de CO_2

Un milieu transparent n'absorbe pas et n'émet pas de rayonnement. Il n'y a donc pas d'échanges radiatifs dans ce milieu. Les gaz suivant cette spécificité sont généralement des molécules symétriques telles que H_2, N_2, O_2 ainsi que leurs mélanges.

A contrario, les molécules telles que le CO_2 absorbent des rayonnements dans certaines zones du spectre thermique. Ces couches gazeuses sont considérées comme des milieux semi-transparents.

Ces milieux semi-transparents dépendent de la nature physico-chimique du milieu, de la pression partielle du gaz (gaz en mélange), de l'épaisseur de la couche gazeuse, de la température de la couche semi-transparente et de la longueur d'onde du milieu considéré.

Les milieux semi-transparents peuvent être aussi bien des gaz que certains solides (verres, plastiques...) ou certains liquides.

Calcul de la température d'un modèle simplifié avec effet de serre

Détermination des coefficients α, τ, et ρ dans le cas d'une couche de verre.

Nous allons étudier l'équilibre thermique d'une surface noire recevant un rayonnement d'une source lumineuse. Cette source et ce corps noir sont séparés par une plaque de verre. Ce modèle est similaire à celui de l'expérience.

Nous supposerons que la plaque de verre n'absorbe pas le rayonnement. Ainsi, $\alpha = 0$.

Le bilan sur la surface noire est le suivant :

Le flux entrant correspond au flux lumineux transmis par le verre ainsi que le flux réfléchi par le verre provenant du corps noir : $\tau ES + \rho_{verre} \times \sigma T_{CN}^4 S + \tau_{verre}(T_{ambiant}) \times \sigma T_{ambiant} \times S$. Le flux entrant fait aussi intervenir une puissance transmise par l'air ambiant entourant l'extérieur du verre. Ce terme permet de ne pas trouver une température du corps noir nulle lorsqu'on coupe la source de lumière. Le corps noir, sans la source, sera à température ambiante. Ce terme supplémentaire est multiplié par la transmittance du verre à température ambiante car ce flux traverse le verre comme les rayonnements provenant de la source principale.

Le flux sortant est le flux émis par le corps noir, il suit la loi de Stefan : $\sigma T_{CN}^4 S$.

L'équilibre radiatif est donc : $\tau ES + \rho_{verre} \sigma T_{CN}^4 S + \tau_{verre}(T_{ambiant}) \sigma T_{ambiant} S = \sigma T_{CN}^4 S \Leftrightarrow \tau E + (\rho_{verre} - 1)\sigma T_{CN}^4 + \tau_{verre}(T_{ambiant}) \sigma T_{ambiant} = 0$

On sait que $\alpha + \rho_{verre} + \tau_{CN} = 1$ et $\alpha = 0$ donc $\tau_{T_S} E + \sigma T_{CN}^4(-\tau_{T_{CN}}) + \tau_{verre}(T_{ambiant}) \sigma T_{ambiant} = 0$.

On va chercher à déterminer $\tau_{T_{CN}}$ par résolution numérique sur Scilab. On connaît la transmission du verre τ_{T_S}. En effet, τ_{T_S} ne varie pas contrairement à $\tau_{T_{CN}}$ qui dépend de la température du corps noir. Celle-ci augmente avec le temps d'exposition jusqu'à atteindre une valeur d'équilibre.

On connaît la transmission du verre grâce à sa courbe de transmission (figure2.4). On peut ainsi en déduire la valeur de τ_{T_S}. La méthode consiste à reprendre la courbe de Planck pour une température Ts, de la multiplier par la courbe de tansmission, d'intégrer la courbe obtenue et de diviser le tout par la loi de Stefan σT_s^4.

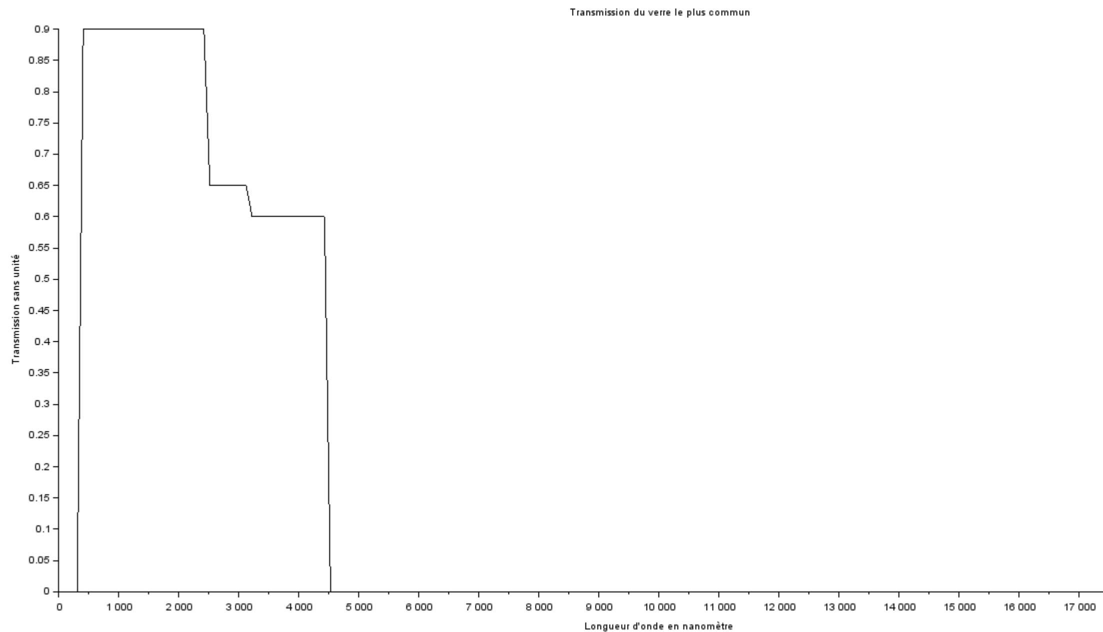


Figure 2.4 – Courbe de transmission du verre

La courbe en noir représente la courbe de transmission du verre. On constate que 90% du rayonnement ultra-violet et visible est transmis par l'atmosphère à la Terre. A contrario, très peu de rayonnement infrarouge n'est transmis par l'atmosphère. Après 5000 nm le verre ne transmet plus les rayonnements. De ce fait, les rayons provenant du Soleil traversent le verre pour atteindre la Terre mais les rayons infrarouges émis par la Terre sont très peu transmis par le verre. Ainsi, l'intérieur de la Serre se réchauffe.

On discerne donc la transmission à la température de la source de la transmission du corps noir qui ne laisse pas passer les rayonnements. Pour calculer $\tau_{T_{CN}}$ nous allons utiliser la fonction fsolve de Scilab qui va effectuer un calcul par itération et permettra d'obtenir la température de stabilisation du CN. Cette méthode ne permet pas de voir l'évolution de la température du CN mais seulement la température de stabilisation.

Nous obtenons finalement pour le cas de la modélisation de l'expérience une température de $382.36°C$. Cette valeur est très importante car notre modèle ne prend pas en compte les pertes par conduction et est assez simplifié. Nous allons voir par la suite si l'ajout de CO_2 est bien à l'origine d'une augmentation de la température terrestre et donc d'un écart de température.

Détermination des coefficients α, τ, et ρ dans le cas d'une couche de verre et de CO_2.

Nous allons étudier l'équilibre thermique d'une surface noire recevant un rayonnement d'une source lumineuse. Cette source et ce corps noir sont cette fois séparés par une plaque de verre et une couche de CO_2 2.5. Ce modèle est similaire à la deuxième partie de l'expérience, expliquée plus loin.

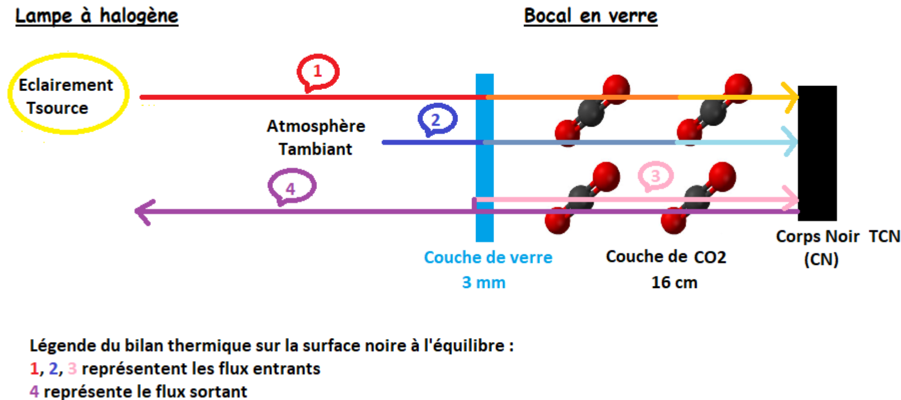


Figure 2.5 – Modèle CO_2 verre

Le bilan sur la surface noire est le suivant :

Le flux entrant correspond tout d'abord au flux lumineux arrivant de la source après le passage dans la couche successivement de verre et de CO_2 : $\tau_{verre}(T_{source}) \times \tau_{CO_2}(T_{source}) \times ES$. La puissance de la source traverse successivement la plaque de verre et la couche de CO_2 ce qui explique que nous multiplions les taux de transmissions du CO_2 et du verre.

Ensuite, nous avons le flux provenant du CN réabsorbé par le CN (ce flux est équivalent au flux non transmis à l'atmosphère) : $\sigma T_{CN}^4 S \times (1 - \tau_{CO_2}(T_{CN}) - \tau_{verre}(T_{CN}))$. Ce flux va traverser successivement la couche de verre et de CO_2.

Ce flux entrant dû à la présence de l'atmosphère vaut : $\tau_{verre}(T_{ambiant}) \times \tau_{CO_2}(T_{ambiant}) \times \sigma T_{ambiant} \times S$

Le flux sortant est le flux émis par le corps noir, il suit la loi de Stefan : $\sigma T_{CN}^4 S$.

L'équilibre radiatif est donc :

$$\tau_{verre}(T_{source})\tau_{CO_2}(T_{source})E+\sigma T_{CN}^4(1-\tau_{CO_2}(T_{CN})-\tau_{verre}(T_{CN}))+\tau_{verre}(T_{ambiant})\tau_{CO_2}(T_{ambiant})\sigma T_{ambiant}-\sigma T_{CN}^4 = 0$$

$$\tau_{verre}(T_{source}).\tau_{CO2}(T_{source}).E+\tau_{verre}(T_{ambiant}).\tau_{CO2}(T_{ambiant}).\sigma T_{ambient}^4+(1-\tau_{CO2}(T_{CN})-\tau_{verre}(T_{CN})).\sigma T_{CN}^4=\sigma T_{CN}^4$$

loi de Stefan

Figure 2.6 – Equation bilan équilibre thermique

On calcule par itération la température du corps noir puisqu'elle augmente jusqu'à sa stabilisation. Pour coller, à notre modèle il a fallu utiliser la loi de Beer-Lambert. En effet, nous avions le spectre de transmission du CO_2 pour une couche de 10 cm d'épaisseur. Il a fallu adapter la courbe à notre situation. Plus il y a de CO_2 à traverser plus il y a d'absorption du fait du nombre plus important de particules.

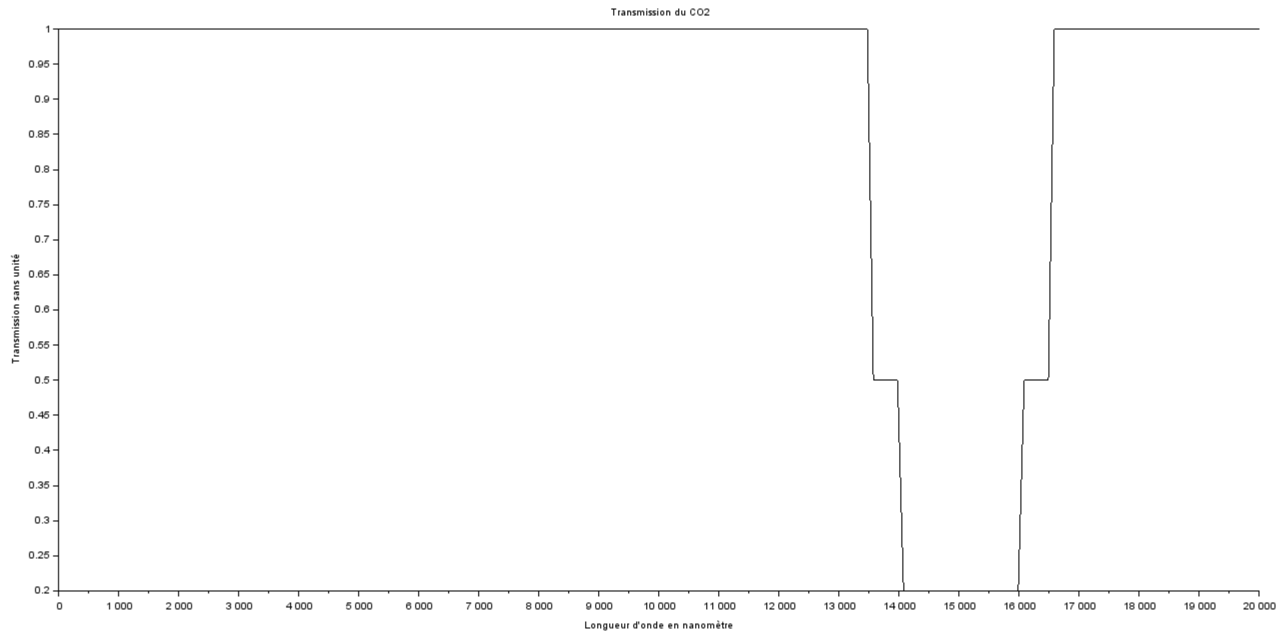


Figure 2.7 – Courbe de transmission du CO_2

On obtient une température finale du corps noir de $382.36°C$ lorsqu'il n'y a qu'une couche de verre dans notre expérience. Lorsqu'on ajoute en plus du CO_2 la température passe à $386.55°C$.

On a donc un écart de $4.19°C$. Nous allons voir par la suite si l'écart de température est validé par l'expérience correspondant à notre modèle.

Chapitre 3

Etude expérimentale

L'objectif de l'expérience

Par l'intermédiaire d'une expérience nous voulons confirmer notre compréhension de l'effet serre. L'expérience a pour but d'observer l'effet de serre et de déterminer le rôle d'un gaz à effet de serre (CO_2) dans ce phénomène.

3.1 Présentation de l'expérience

Afin de modéliser l'effet de serre nous allons proposer un modèle simplifié de l'ensemble : Terre, atmosphère et Soleil. En effet, nous allons mettre dans un bocal transparent de la terre et l'ensemble va être éclairé par une lampe halogène. L'atmosphère est modélisée par le bocal et l'air contenu à l'intérieur. Enfin, le soleil est modélisé par la lampe halogène. Un thermocouple est introduit dans le bocal afin d'observer les variations de température du système.

Pour observer le rôle du CO_2 nous allons refaire la même expérience en reprenant le même modèle et en remplaçant l'air par du CO_2 . Enfin, un seul côté du bocal sera exposé à la lampe, les autres côtés du bocal seront protégés thermiquement.

Liste du matériel

- 1 bocal
- 1 thermocouple
- 1 Thermomètre
- 200g de terre
- Une lampe halogène (24V)
- Isolant thermique
- Papier aluminium
- CO_2
- 2 étaux
- Générateur
- Chronomètre

3.2 Protocole expérimental

Étape 1 : détermination de l'éclairement de la lampe

Tout d'abord, il nous cherchons à connaître l'éclairement de notre lampe halogène à une distance de 5,5cm du bocal. Nous avons à disposition un solarimètre qui est un instrument permettant de mesurer, en watt par mètre carré, l'intensité du rayonnement solaire reçue en un point. Nous allons nous servir du solarimètre afin de calculer l'éclairement de notre lampe. Cependant, le solarimètre sature lorsqu'une tension de 24V est appliquée à la lampe. Nous allons nous servir des valeurs de l'éclairement donné par le solarimètre à une tension inférieure à 24V, afin par la suite de déterminer la valeur à 24V par interpolation. Pour cela on place le solarimètre sous la lampe à une distance de 5,5cm puis on fait varier la tension appliquée aux bornes de la lampe et enfin on

note dans un tableur les résultats obtenus. On obtiens donc la courbe de la figure 3.1.

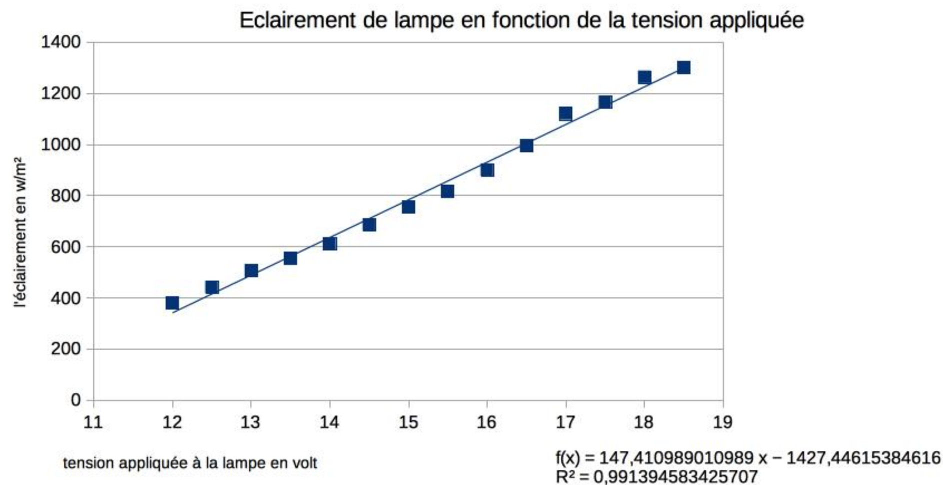


FIGURE 3.1 – Courbe de l'éclairement de la lampe halogène

Ainsi grâce à une régression linéaire on obtient une équation qui permet de calculer l'éclairement à 24V. En effet, le coefficient de corrélation est presque égal à 1. On obtient donc que l'éclairement (E(v)) en fonction de la tension (v) est égale à : $E(v) = 147,4v - 1427,4$ Avec (E(v)) en W/m^2 et v en V . L'éclairement à 24V est donc égale à $2110W/m^2$.

Étape 2 : Protocole expérimental avec l'air ambiant

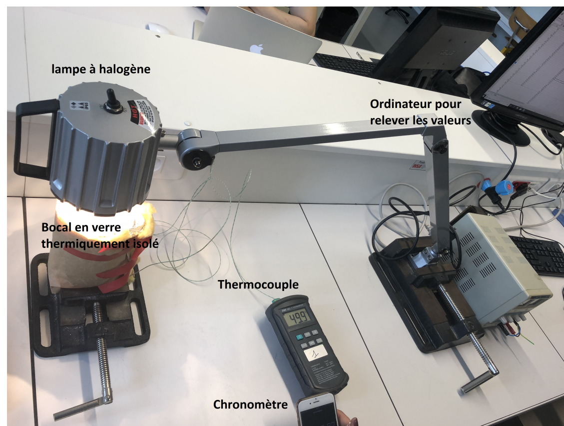
- Préparation du bocal
- Introduire 200g de terre
- Percer le couvercle du bocal
- Protéger de l'extrémité du thermocouple avec de l'aluminium afin d'éviter des radiations en provenance de la lampe
- Introduire le thermocouple dans le trou percé puis étanchéifier avec du scotch et du silicone
- Placer le thermocouple dans la terre
- Isoler thermiquement toutes les faces du bocal à part une seule à l'aide de la mousse et du papier aluminium
- Fixer le bocal à un étau
- Brancher le thermocouple

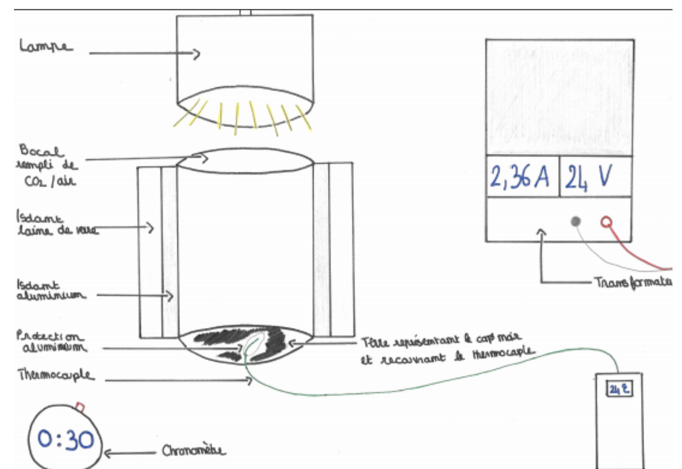
- Préparation de la lampe
- Fixe la lampe à un étau qui va lui servir de socle
- Brancher la lampe au générateur réglé à 24V

- Prise de mesure
- Placer le bocal sous la lampe à une distance de 5,5cm
- Relever la température toutes les 30 secondes pendant 1h

Étape 3 : Protocole expérimental avec le CO_2

Pour cette étape on modifie seulement la préparation du bocal puis on reproduit exactement le protocole décrit précédemment.





— Reprendre le bocal préparer précédemment
— Percer deux trous supplémentaire Introduire le CO_2 dans un des deux trous
— Attendre quelques secondes que le bocal soit entièrement rempli de CO_2
— Étanchéifier les deux trous à l'aide du scotch et du silicone

3.3 Résultats et observations

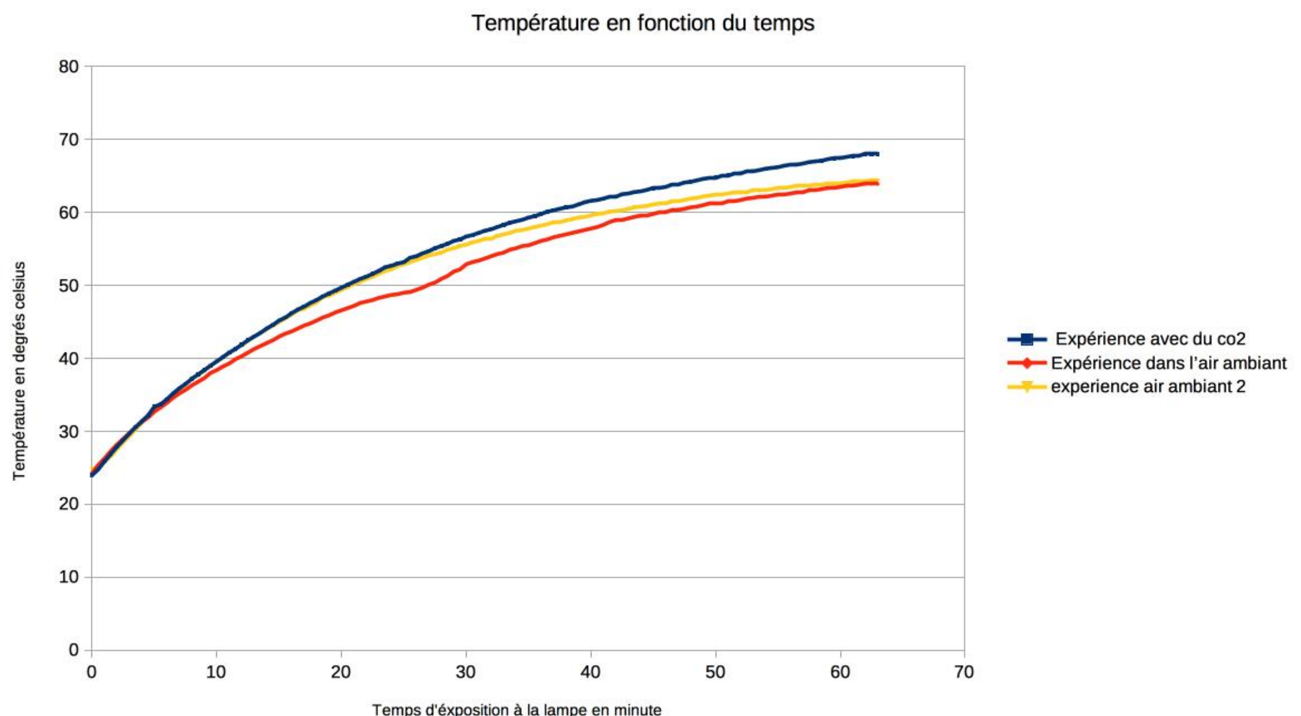


FIGURE 3.2 – Variation de la température dans le bocal en fonction du temps

Dans la figure 3.2, les résultats obtenus, des deux étapes précédemment décrites, y sont présentées. En effet, les courbes rouge et jaune représentent la variation de température dans le bocal lorsqu'il contient de l'air ambiant et la courbe bleu représente la variation de température dans le bocal lorsqu'il contient du CO_2 . Sur l'ensemble des courbes on observe une forte augmentation de température ce qui est représentatif de l'effet de

serre dans le bocal. On observe également qu'au bout d'une heure d'exposition, l'effet de serre est plus fort lorsque le bocal contient du CO_2 .

On a un écart de 4°C entre un bocal contenant du CO_2 pur et un bocal contenant de l'air. Cet écart est très proche de celui obtenu durant la modélisation.

3.4 Sources d'erreurs et améliorations possibles

Les expériences avec l'air ambiant et avec le CO_2 dans le bocal ne peuvent pas être effectuées en même temps parce que la lampe à notre disposition peut seulement éclairer un seul bocal à la fois. Ainsi la température à laquelle se fait les deux expériences est différente de même pour l'éclairement reçu. En effet, le bocal reçoit également un éclairement venant du milieu extérieur en plus de celle de la lampe. De plus, il existe aussi une incertitude, due au thermomètre et la lecture du chronomètre, qui peut être négligée dans le cas du chronomètre car très faible (0,1seconde) par rapport à notre période de 30 secondes. Lors de la répétition de l'expérience à l'air ambiant la température de la salle n'était pas identique ce qui pourrait expliqué l'écart entre les deux courbes. Pour améliorer notre expérience il est envisageable d'effectuer dans le noir complet pour éviter un autre éclairement supplémentaire et également d'effectuer l'expérience à l'air ambiant et au CO_2 en même temps grâce à une lampe ayant une surface d'éclairement plus grande afin d'être dans les mêmes conditions.

Tableau récapitulatif des résultats obtenus :

Températures obtenues	Expérience	Modélisation
Absence de CO2	64°C	382.36°C
Présence de CO2	68°C	386.55°C
Écart de température	4°C	4.19°C

Conclusion et perspectives

A travers des lois et des courbes nous avons pu mettre en évidence que le Soleil, corps chaud, émet des radiations de courtes longueurs d'onde et que la Terre, corps froid, émet des radiations de grandes longueurs d'ondes. Or, la courbe de transmission du CO_2 montre que le CO_2 laisse passer à 90% les rayonnements d'un corps chaud, soit ceux du Soleil, et limite le passage des rayonnements provenant d'un corps froid tel que la Terre. C'est ainsi que l'atmosphère se réchauffe. L'expérience nous a montré une différence de température entre de la terre contenue dans un bocal avec de l'air et de la terre dans un bocal plein de CO_2. Le bocal contenant du CO_2 pur avait une température supérieure de 3 degrés Celsius. Nous avons ensuite modélisé avec le logiciel Scilab le phénomène pour l'expérience du bocal. Nous avons observé la même variation de température. Pour cette modélisation nous avons réalisé des bilans de flux entrants et sortants sur le corps noir à l'équilibre thermique.

Ce projet nous a permis de comprendre ce qu'est l'effet de serre. Nous avons appris beaucoup sur le rayonnement thermique que nous reverrons, pour une bonne partie d'entre nous, dans le département EP de l'INSA. Nous avons aussi appris un nouveau langage de programmation à travers le logiciel Scilab. Ce projet s'est donc révélé très intéressant et enrichissant. Nous avons appris à rechercher les informations, les comprendre et les utiliser selon nos besoins.

Ce projet pourrait être amélioré en proposant un modèle plus proche de l'expérience que nous avons effectué. Il prendrait en compte les pertes thermiques, nous n'avons pas eu le temps de modéliser et qui ne faisaient pas partie de nos priorités. Au départ, nous pensions représenter l'effet de serre avec le modèle de la Terre et du Soleil. Cependant ce modèle prenait en compte beaucoup de paramètres et nous avons trouvé plus pertinent, dans un premier temps, de comparer l'expérience à un dispositif lui ressemblant. Il serait intéressant de proposer le même intitulé de projet l'année prochaine et de s'intéresser au modèle de la Terre et du Soleil. Les groupes de projet pourraient reprendre ce que nous avons déjà fait et aller plus loin dans la modélisation.

Bibliography

[1] Initiation aux transferts thermiques, Jean-François Sacadura, INSA de Lyon et Centrale Lyon, édition 1980

[2] Changements climatiques, Climat, http://www.climat.be/fr-be/changements-climatiques/le-climat/leffet-de-serre-un-phenomene-naturel, vu le 3 mars 2018

[3] L'effet de serre naturel, Climate chalenge, http://www.climatechallenge.be/fr/des-infos-en-mots-et-en-images/le-changement-climatique/leffet-de-serre/leffet-de-serre-naturel.aspx, vu le 15 janvier 2018

[4] Quelles solutions pour le climat?, Mtaterre, http://www.mtaterre.fr/node/250, vu le 24 février 2018

[5] Changement climatique, Notre planete, Https://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/changement-climatique-responsabilites-pays.php, vu le 6 avril 2018

[6] Quelles sont les solutions?, Climate chalenge, http://www.climatechallenge.be/fr/des-infos-en-mots-et-en-images/quelles-sont-les-solutions.aspx, vu le 7 avril 2018

[7] Journal d'un terrien, Serge Boisse, http://sboisse.free.fr/planete/maison-ecologique/maison-bioclimatique.php, vu le 7 avril 2018

[8] Climat : l'agriculture est la source d'un quart des émissions mondiales de gaz à effet de serre, Reporterre, https://reporterre.net/Climat-l-agriculture-est-la-source, vu le 8 avril 2018

[9] L'énergie du pétrole, Lycée Joffre, http://energie.petrole.free.fr/combustion.html, vu le 8 avril 2018

[10] Comment l'homme influence-t-il le climat?, Otmed, http://www.otmed.fr/questions-reponses/comment-lhomme-influence-t-il-le-climat, vu le 11 mai 2018

[11] Courbe de transmission, Verrehaget, http://www.verrehaget.fr/le-verre-sodocalcique/, vu le 15 mai 2018

[12] Eclairement lumineux, Wikipedia, https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89clairement_lumineux, vu le 20 février

[13] Bilan Radiatif à la surface de la Terre, Docplayer, http://docplayer.fr/20584806-Td-1-bilan-radiatif-a-la-surface-de-la-terre-correction.html, 20 avril 2018

[14] Définitions et lois du rayonnement Thermique, Université de Nantes http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/claude_saintblanquet/rayonnem/11defloi/11defloi.htm, vu le 28 janvier 2018

[15] Le rayonnement thermique et la loi du Corps Noir, ENS Lyon, http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/bilan-radiatif-terre1.xml, vu le 3 février

[16] Modélisation de l'effet de serre, Académie de Nice, http://www.ac-nice.fr/svt/productions/freeware/effetserre/index.htm, vu le 18 mai 2018

[17] Modélisation de la température à la surface d'une planète, ENS Lyon, http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/paleo/systemclim/effet-de-serre/data/Presentation.pdf, vu le 29 mars 2018

[18] Température à l'intérieur d'une serre, Université de Nantes, http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/claude_saintblanquet/exthermique/exo8_serre/exo8r2_serre.htm, vu le 03 mai 2018

[19] Estimation de la température d'une planète à l'aide de la loi de rayonnement du corps noir, ENS Lyon, http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/CorpsNoir_Climat.xml, vu le 08 avril 2018

Annexes

Code Scilab

```
clear

lambdamax=20000;//longueur d'onde maximale en nm
Tsource=5000;
Tambiant=300; //Lumiance ambiante
E=2080;  //Eclairement de la source lumineuse
Lexp=1*16*8/2; //hauteur de la bouteille en cm
Lref=10; //eppaisseur de CO2 associée au spectre de trnasmission en cm
LVerre=3 //Eppaisseur du verre en mm
LVRef=3; //Eppaisseur de référence pour le verre.

h=6.6260695729E-34
c=299792458
kB=1.380648813E-23
sigma=(2*%pi^5*kB^4)/(15*h^3*c^2);

lambda=linspace(1,lambdamax,200); //Table de longueurs d'ondes en nm


//émittance calculée à partir de la loi de Planck pour un corps noir
//émittance dépendant de la longueur d'onde et de la température
function M=Planck(lambda,T)
    lambdam=lambda*1E-9; //lambdam est en mètre (unité internationale); lambda
        est en nanomètre
    M=2*h*c^2*(lambdam.^(-5)).*(exp(h*c*lambdam.^-1/kB/T)-1).^-1
    M=%pi*M*1E-9;
endfunction

//courbe de transmission du verre
//épaisseur du verre de 3 mm
function T=TauVerre(lambda)
    T=zeros(lambda);
    Select=(lambda>320&lambda<4500);
    T(Select)=0.9;
    Select=(lambda>3200&lambda<4500);
    T(Select)=0.6;
    Select=(lambda>2500&lambda<3200);
    T(Select)=0.65;
endfunction

//courbe de transmission du CO2
//épaisseur de 10 cm de CO2
function T2=TransmissionCO2(lambda)
    T2=ones(lambda);
    Select=(lambda>13500&lambda<16500);
```

```
    T2(Select)=0.2;
    Select=(lambda>16000&lambda<16500);
    T2(Select)=0.5;
    Select=(lambda>13500&lambda<14000);
    T2(Select)=0.5;
    Select=(lambda>4200&lambda<4500);
endfunction


//calcul de l'émittance transmise par le verre
function [MT]=PlanckTauVerre(lambda,Tinteg)
    M=Planck(lambda,Tinteg);
    Tr=TauVerre(lambda).^(LVerre/LVRef);
    MT=M.*Tr
endfunction

//calcul de l'émittance transmise par le CO2
function [MT]=PlanckTauCO2(lambda,Tinteg)
    M=Planck(lambda,Tinteg);
    Tr=TransmissionCO2(lambda).^(Lexp/Lref);
    MT=M.*Tr
endfunction



//taux de transmission de l'énergie provenant de la source à travers le verre
//rapport de l'émittance du verre (intégrale de la courbe de Planck pour un
    corps réel, ici le verre) sur l'émittance du corps noir
function [transGlobale]=CalculTauVerreGlobal(T)
    Tinteg=T;
    transGlobale=intg(0,lambdamax*4,PlanckTauVerre)/sigma/T^4
endfunction


//calcul du taux de transmission de l'énergie provenant de la source à travers
    une couche gazeuse de CO2
function [transGlobale]=CalculTauCO2Global(T)
    Tinteg=T;
    transGlobale=intg(0,lambdamax*4,PlanckTauCO2)/sigma/T^4
endfunction

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
Vérification hypothèse du corps noir : comparatif loi de Planck et de Stefan
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
intPlanck=intg(0,lambdamax,Planck) //intégration de la loi de Planck
disp("valeur émittance par intégration de la loi de Planck")
disp(intPlanck);
M2=sigma*T^4;//émittance totale obtenue par la loi de Stefan
disp("valeur émittance par la loi de Stefan"
disp(M2)



//////////////////////////////////////////////////////////////////////
//////////////////////////////////////////////////////////////////////
//Calcul des transmission pour la source
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
MSource=Planck(lambda',Tsource)*E/sigma/Tsource^4
[TauVerreSource]=PlanckTauVerre(lambda',Tsource)*E/sigma/Tsource^4
[TauCO2Source]=PlanckTauCO2(lambda',Tsource)*E/sigma/Tsource^4


//Calcul de la transmission pour la verre pour la source lumineuse
[TauVSourceGlobal]=CalculTauVerreGlobal(Tsource)
disp("ransmission globale pour la verre pour la source lumineuse");
disp(TauVSourceGlobal)
//Calcul de la transmission pour CO2 pour la source lumineuse
[TauCO2SourceGlobal]=CalculTauCO2Global(Tsource)
disp("transmission globale pour le CO2 pour la source lumineuse");
disp(TauCO2SourceGlobal)

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//Calcul des transmission pour le rayonnement ambiant
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
[TauVAmbGlobal]=CalculTauVerreGlobal(Tambiant)
[TauCO2AmbGlobal]=CalculTauCO2Global(Tambiant)

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//Calcul de la température du corps noir à l'équilibre
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//équation de l'équilibre thermique des flux pour une source traversant une
    plaque de verre et une couche gazeuse de CO2
function [err]=Bilan(Tcn)
    //Calcul de la transmission pour la verre pour le corps noir
    if Tcn>0 then
        [TauVCNGlobal]=CalculTauVerreGlobal(Tcn)
        //Calcul de la transmission pour CO2 pour le corps noir
        [TauCO2CNGlobal]=CalculTauCO2Global(Tcn)
    else
        TauVCNGlobal=0;
        TauCO2CNGlobal=1;
    end

    //Sources
    err=TauVAmbGlobal*TauCO2AmbGlobal*sigma*Tambiant^4 //Flux arrivant du
        rayonnement ambient
    err=err+TauVSourceGlobal*TauCO2SourceGlobal*E //Flux arrivant de la source
        diminué de la transmission du verre et du CO2
    err=err+sigma*Tcn^4*(1-TauCO2CNGlobal*TauVCNGlobal) //Flux émis par le Corps
         noir réfléchi vers lui même
    //Puis
    err=err-sigma*Tcn^4  //Flux émis par le corps noir
endfunction


Tcn=fsolve(400,Bilan) //Recherche de Tcn respectant le bilan


////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//Calcul des transmission des flux émis par le corps noir
////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////
MCN=Planck(lambda',Tcn)
[TauVerreCN]=PlanckTauVerre(lambda',Tcn)
[TauCO2CN]=PlanckTauCO2(lambda',Tcn)

[TauVCNGlobal]=CalculTauVerreGlobal(Tcn)
disp("Transmission globale pour le verre pour le corps noir");
disp(TauVCNGlobal)
//Calcul de la transmission pour CO2 pour le corps noir
[TauCO2CNGlobal]=CalculTauCO2Global(Tcn)
disp("Transmission globale par le CO2 pour le corps noir");
disp(TauCO2CNGlobal)


////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//Tracé des courbes
////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////

xset("window",0);
clf
plot2d(lambda/1000,[MSource,TauVerreSource,TauCO2Source,MCN,TauVerreCN,TauCO2CN
    ],[-1,3,5,-1,-3,4],logflag='nn');
xtitle('Emittances de la source lumineuse et Emittances transmises');
legend(['Source','Source transmise par le verre','Source transmise par le CO2','
    CN','CN transmise par le verre','CN transmise par le CO2'])
xlabel('Longueur d''onde en micromètres');
ylabel('Emittance en Watt par mètre carré')



disp("Température du corps noir en C");
disp(Tcn-273.15)
```

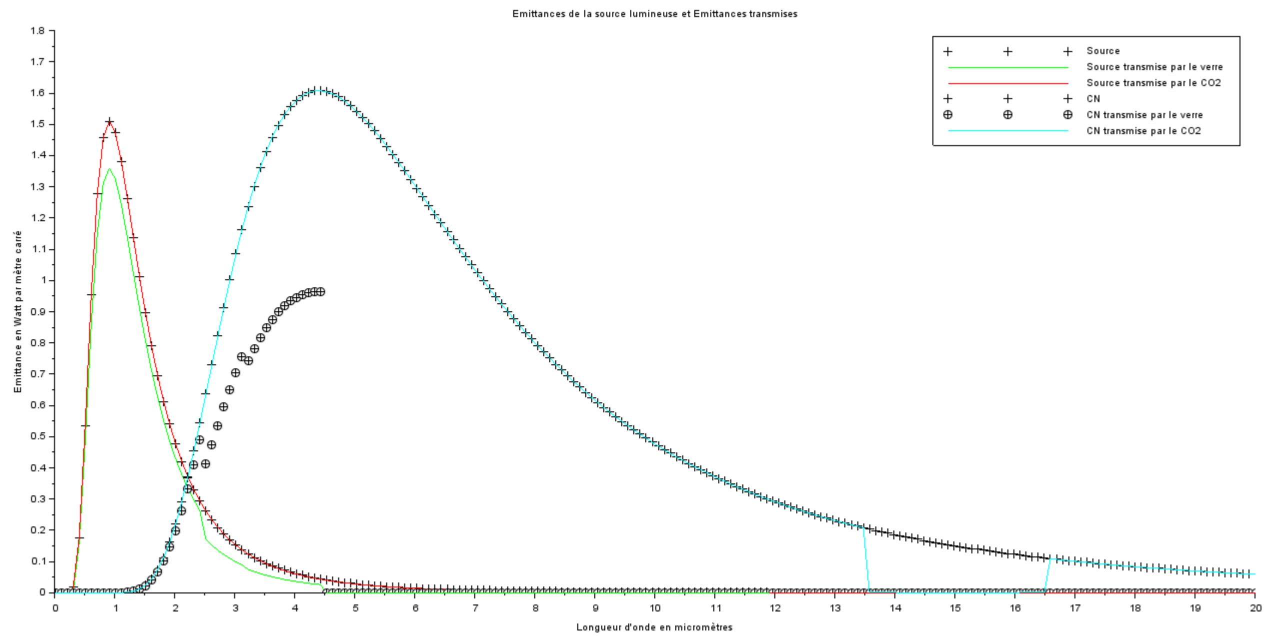


Figure 3.3 – courbes obtenues avec Scilab